



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-133

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017  
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Crecimiento y producción de biomasa de cultivos energéticos con sauce, chopo y abedul en terrenos ociosos de minería en el Norte de España

CASTAÑO-DÍAZ, M.<sup>1</sup>, AFIF KHOURI, E.<sup>1</sup>, BARRIO-ANTA, M.<sup>1</sup>, MENENDEZ-RODRIGUEZ, J.<sup>2</sup> y CÁMARA-OBREGÓN, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Sistemas Forestales Atlánticos (GIS-Forest). Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, 33600, Asturias.

<sup>2</sup> SADIM-Grupo Hunosa, C/ Jaime Alberti, 2. 33900, Ciaño- Langreo. Asturias.

### Resumen

El principal objetivo del presente estudio, es la evaluación del crecimiento y producción potencial de biomasa al final de los 5 años del primer turno, empleando especies de los géneros *Betula* sp., *Populus* spp. y *Salix* spp. en tres plantaciones de 2,5 ha cada una de ellas, instaladas en antiguas escombreras mineras, en el Municipio de Langreo (Asturias). El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados en el que se consideraron 3 factores cualitativos para el primer ensayo (clon, densidad y tratamiento (fertilización + herbicida)) y 2 para el resto (clon y tratamiento). A pesar de las malas condiciones estacionales (suelo), se consiguió una buena adaptación de las especies al medio, así como la respuesta a los distintos tratamientos aplicados. El factor clon fue el que más ha condicionado la producción de biomasa aérea, siendo las especies de chopo las que mejores rendimientos han conseguido, seguido de los sauces; si bien la aplicación de fertilizante y herbicida tuvo también efectos significativos sobre dicha producción, respecto a las parcelas control. Una capacidad productiva significativa de estos clones en términos de biomasa con un fin bioenergético, permitiría establecer comercialmente estos cultivos en áreas marginales como las que se encuentran en las Cuencas Carboníferas en el centro de Asturias.

### Palabras clave

Bioenergía, SRC, *Salix* sp., *Populus* sp., *Betula* sp., minería, escombreras, restauración.

### 1. Introducción

La previsión para el año 2020, es que el 20% de la energía consumida en la Unión Europea (UE) procesa de fuentes de energía renovables (EUROPEAN COMMISSION, 2008). Para cumplir con los objetivos energéticos y climáticos de la UE, sería necesario que parte de esa energía proceda de la biomasa al tratarse de una opción sostenible, además de considerarse como una alternativa prometedora en la actualidad, ya que la confirmación de los efectos negativos sobre el medio ambiente del uso de combustibles fósiles, hizo que los países más desarrollados, incluidos España y la UE, adoptasen compromisos para impulsar el uso de fuentes de energía limpia y renovable (CONSEJO DE EUROPA, 2007; NACIONES UNIDAS, 2015). Por tanto, es predecible que el uso de la biomasa como fuente de energía llegue a aumentar en un 45% desde el 2006 hasta el 2020, lo que representaría el 8% del aumento previsto de la energía renovable en la Unión Europea (BLENNOW et al., 2014).

Por definición, la Directiva 2009/28/CE indica que la "biomasa es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales (Directiva 2009/28/CE)". Entre las ventajas que presenta se puede destacar la diversidad de sus recursos y tecnologías de conversión lo que la convierten en una fuente de energía extremadamente versátil, capaz de sustituir los combustibles fósiles de una manera sostenible y respetuosa del medio ambiente y contribuye a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (BOYLE,

2004). En la actualidad existen diferentes clasificaciones de la biomasa según sea origen, estado, destino, etc. En este contexto, a la biomasa leñosa, y dentro de ella la forestal, se le considera como una atractiva fuente de energía renovable, con aplicaciones térmicas y eléctricas (IDAE, 2007). Además de otras posibles ventajas, como señala GONZÁLEZ-FERREIRO et al., (2013) que indican que el establecimiento de plantaciones de biomasa para la producción de energía serviría como actividad de recuperación en las zonas rurales, el equilibrio del CO<sub>2</sub> neutro o incluso la recuperación de zonas degradadas. Todas estas razones hacen que la instalación de cultivos forestales con fines bioenergéticos se puede considerar una opción de futuro prometedora.

A este tipo de plantaciones se las conoce como cultivos forestales energéticos (internacionalmente *Short Rotation Coppice* "SRC"). Entre las múltiples ventajas que presentan, destaca que se pueden instalar en una amplia gama de tipos de tierra, incluyendo tierras marginales (BROECKX et al., 2012). ZURBA et al., (2013) recomendaron plantar SRC en terrenos marginales, en paralelo con otras opciones de manejo sostenible de la tierra. De esta manera, el uso de SRC en terrenos pobres también contribuye a largo plazo a mejorar la calidad del suelo y la biodiversidad, además de proteger las aguas subterráneas y prevenir la erosión del suelo.

Entre las ventajas del uso de Salicaceae (*Salix* spp. y *Populus* spp.) se podrían especificar, entre otras cosas, la facilidad que presentan en el establecimiento de la plantación (a partir de estaquillas que tienen un coste de producción reducido y una buena capacidad de brotación); la amplia gama de material genético mejorado; su capacidad de obtener elevados rendimientos de producción de biomasa en cortos períodos de tiempo y presentar un rebrote vigoroso después del corte (KEOLEIAN & VOLK, 2005). Teniendo en cuenta la amplia adaptabilidad de las especies de los géneros *Salix* y *Populus* a condiciones extremas y a suelos contaminados y empobrecidos en nutrientes (KUZOVKINA & QUIGLEY, 2005), los SRC con estas especies se pueden establecer en suelos no aptos para la explotación agrícola (JAMA & NOWAK, 2012) o en tierras marginales. De hecho, actualmente son considerados uno de los sistemas de cultivo de bioenergía más prometedores para uso en regiones templadas de Europa (VENTURI et al., 1999), así como en Canadá y Estados Unidos (TAHVAINEN & RYTKO, 1999; ), junto con otras especies como; *Eucalyptus* sp. y *Robinia pseudoacacia*.

Asturias es una de las regiones españolas de más antigua tradición industrial donde el carbón ha sido el centro de su actividad económica y social (PAREDES et al., 2016). El fin del ciclo económico basado en esta labor y materializado en el cierre de la extracción de carbón, supuso una clara recesión en las comarcas mineras asturianas durante finales del siglo pasado hasta la actualidad (ANTUÑA, 2005). La utilización de las energías renovables se ha considerado especialmente relevante en las zonas mineras con el fin de garantizar una protección eficaz del medio ambiente, así como la sostenibilidad de la energía (PAREDES et al., 2016). Como valor añadido, este aprovechamiento de la biomasa forestal debería ser considerado parte de la estrategia de desarrollo rural, ya que sus producciones económicas generan rentas y empleo que se quedan, en su mayor parte, en el medio rural fijando la población (MONTERO Y SERRADA, 2013).

La empresa Hulleras del Norte S.A., más conocida popularmente por su acrónimo "HUNOSA", en la actualidad "Grupo HUNOSA", ha sido la compañía minera por excelencia en el país. Tras estos últimos años de dificultades, la compañía viene acometiendo un duro esfuerzo de modernización y adaptación al marco energético, manteniendo hoy en día la actividad minera -de extracción y comercialización de carbón- y la explotación de una central termoeléctrica, además de impulsar nuevos campos de negocio en energías renovables como la geotermia, eólica y biomasa, con el objetivo fundamental de buscar alternativas para asegurar el futuro de aquellas zonas donde la minería fue el pilar de la actividad económica y social. El abandono gradual de las minas ha supuesto para la empresa la disposición de grandes extensiones de terrenos baldíos con suelos de mala calidad, y en ocasiones con topografías complejas, lo que ha dificultado enormemente la asignación de algún uso agroforestal sostenible. De las 4.000 ha que el Grupo HUNOSA posee en propiedad, casi un 20% son terrenos ociosos de minería restaurados, sin aprovechamiento actual y con pendientes fácilmente mecanizables (<30%), lo que convierte estas zonas en áreas potencialmente adecuadas para el establecimiento de plantaciones con fines bioenergéticos para su propio autoabastecimiento (cultivos energéticos forestales).

Entre los años 2008 al 2010, se instalaron tres ensayos experimentales con cultivos energéticos forestales empleando abedul, y diferentes especies de chopos y de sauce en tierras mineras abandonadas, propiedad del Grupo Hunosa. Estos diseños experimentales se plantearon con la finalidad de obtener información sobre el crecimiento y la producción de biomasa del material vegetal empleado establecido en un área restaurada de carbón, evaluando los efectos del clon, el tratamiento (fertilización + herbicida) y la densidad de siembra sobre el rendimiento de los cultivos.

## 2. Objetivos

El presente estudio se orienta hacia la obtención de información acerca de los aspectos culturales, de cultivo y de producción de biomasa de cultivos energéticos forestales establecidos con diferentes clones de *Salix* y *Populus*, y de género *Betula*. Su objetivo principal es la evaluación de la capacidad de crecimiento y producción de biomasa de cada una de las especies ensayadas durante su primer turno de desarrollo (5 años), en función de las características del sitio, de su respuesta a una serie de tratamientos aplicados.

## 3. Metodología

### - Área de estudio

Las zonas de estudio se encuentran ubicadas en el norte de España (región de Asturias). Cerca de  $\approx 6,5$  ha fueron plantadas con cultivos energéticos forestales empleando diferentes clones de chopo, sauce y abedul, en terrenos pertenecientes a antiguas escombreras de carbón de la empresa Hunosa. En total, se efectuaron 3 ensayos en distintas áreas de recuperación: Mozquita, Cantil I y Cantil II, entre los años 2008 y 2010.

En relación a los datos climáticos del área de estudio, esta zona se caracteriza por una temperatura media anual de  $13^{\circ}\text{C}$  y una precipitación media anual de 1115 mm, de los cuales 344,7 mm caen durante la temporada de crecimiento (mayo-septiembre). El clima es oceánico con altas precipitaciones anuales y, aunque la precipitación es relativamente baja en algunas zonas, la sequía fisiológica no ocurre en ninguna parte de la región, que se encuentra totalmente dentro de la Región Biogeográfica Europea del Atlántico (EEA, 2011).

### - Diseño experimental

La primera de las plantaciones se realizó en el año 2008 en Mozquita, los factores a estudiar en este primer ensayo fueron: el tipo de clon (Tabla 1), la densidad de plantación (dos niveles: 10.000 y 15.000 pies  $\text{ha}^{-1}$ ) y el tratamiento (F0=Control; F1=300 kg  $\text{ha}^{-1}$  N-P-K 6:20:12 y 4 l  $\text{ha}^{-1}$  Glifosato; F2=600 kg  $\text{ha}^{-1}$  N-P-K 6:20:12 y 4 l  $\text{ha}^{-1}$  Glifosato), (Tabla 2). Las cantidades de fertilizante a emplear se eligieron en vista de los resultados obtenidos en el análisis de suelo previo a la plantación, teniendo en cuenta el límite máximo de cantidad de nitrógeno permitido a aplicar en zonas vulnerables, que es de 170 Mg  $\text{ha}^{-1}$ . El diseño experimental constó de 3 bloques, cada uno de ellos compuesto por 18 parcelas de 400  $\text{m}^2$  (20x20 m) constituido por 9 filas dobles con 22 o 33 cortes por fila (dependiendo de las densidades de población), dispuestas aleatoriamente, siendo un total de 54 parcelas. Tras realizar un primer seguimiento del crecimiento en el ensayo de Mozquita, los resultados apenas mostraron diferencias de desarrollo en función del factor densidad, por lo que se decidió que para las futuras plantaciones en el área del Cantil I y Cantil II, solamente se tendría en cuenta una sola densidad de plantación, de 10.000 pies  $\text{ha}^{-1}$ . El diseño experimental llevado a cabo en Cantil I y II fue el mismo que en el caso de Mozquita, manteniendo el número de parcelas para cada ensayo; las dosis de fertilizante y herbicida propuestas también fueron las mismas.

Sin embargo, la elección del material vegetal y la densidad de plantación como ya se indicó anteriormente, sufrieron modificaciones. En Cantil I, el material vegetal utilizado, fue una variedad de clones de chopo, sauce y abedul (Tabla 1). Todos ellos fueron elegidos por su capacidad para adaptarse a las condiciones físicas propias de la escombrera. Tras observar durante el primer año el desarrollo de las plántulas introducidas en Cantil I, y comprobando que el abedul no consiguió el

crecimiento esperado, en la plantación instalada en el Cantil II, únicamente se emplearon clones de *Populus* y *Salix* (Tabla 1), ya que ambas mostraron un desarrollo adecuado en los otros dos ensayos.

- **Preparación del terreno y cuidados culturales previos a la plantación**

En el procedimiento llevado a cabo durante la fase de instalación del cultivo en los tres ensayos se siguió el mismo proceso. La preparación del terreno se llevó a cabo durante el final del invierno y comienzos de la primavera en los años de instalación del cultivo. Se procedió directamente a las labores de preparación del terreno, puesto que la vegetación preexistente, compuesta fundamentalmente por herbáceas, no requería de un tratamiento previo, siendo posible su eliminación de forma simultánea al acondicionamiento del terreno. El terreno se preparó mediante un subsolado siguiendo la línea de máxima pendiente, a una profundidad media-alta (0,60 a 1,00 m), para airear bien el terreno y mejorar el establecimiento de los sistemas radicales. Tras el subsolado se realizó un alzado completo del terreno con una grada de discos agrícola y posteriormente un pase de rotovator, para disponer un suelo bien mullido y meteorizado en el momento de la plantación. Una vez finalizada la preparación del terreno, se procedió a aplicar una fertilización de fondo en cada una de las parcelas de abonado [NPK (8:24:16)] en dosis de 500 kg/ha. El fertilizante se incorporó al suelo con el gradeo ya descrito a una profundidad de más de 20 cm. Después de laborear el terreno, se procedió al replanteo de las 54 parcelas en el terreno, marcando los cuatro vértices con estacas y etiquetas según el código de la parcela.

- **Plantación**

La plantación se realizó manualmente con estaquillas de unos 20 cm de longitud y entre 1,5 y 2 cm de diámetro. Hasta el momento de la plantación fueron almacenados en cámara frigorífica a 3°C. Para favorecer el enraizamiento, los esquejes fueron sumergidos en agua 48 h antes de la siembra. Las estaquillas fueron clavadas en el suelo dejando unos 3-4 cm por encima del nivel del mismo. Las dimensiones dependen exclusivamente de la densidad seleccionada. Para densidades de 10.000 pies/ha se utiliza una separación entre plantas dentro de la misma línea de 0,9 m y de 0,6 m para densidades de 15.000 pies/ha. La separación entre líneas adyacente es siempre de 0,75 m, siendo la separación entre dobles líneas de 1,5 m. Inmediatamente después de plantar, se aplicó Oxifluorfenol (5 l ha<sup>-1</sup>) con la finalidad de prevenir las malas hierbas emergentes durante los primeros meses de crecimiento. No se realizó riego ni control de plagas o enfermedades durante el período de cultivo en el área de estudio.

- **Inventarios de crecimiento y producción de biomasa**

La información relativa al crecimiento se obtuvo siguiendo el protocolo descrito por la FORESTRY COMMISSION (2003) para la toma de datos en plantaciones de sauce y chopo en rotaciones cortas. Según sus indicaciones, se midieron el número de brotes por cepa, la altura de cada uno de los brotes (m) y los diámetros basal (a 0,25 m del suelo) y normal (a 1,30 m) de todos ellos. En cada uno de los ensayos, coincidiendo con el final del primer turno (a los 5 años de cultivo), se llevaron a cabo mediciones en el centro de cada una de las 54 parcelas del estudio, denominadas subparcelas, con la finalidad de evitar el efecto borde. Se midió un total de 40 cepas en cada una de ellas. Posteriormente, se cortaron 10 cepas en cada subparcela descrita anteriormente, en cada una de las plantaciones, lo que supuso un total de 1620 cepas. Tras su peso en verde, las muestras se secaron en una estufa de aire forzado a 70°C, hasta que alcanzaron peso constante seco. A continuación se estimó la producción de biomasa seca por hectárea (Mg ha<sup>-1</sup>) como producto de la producción por cepa y el número de cepas por hectárea.

- **Análisis estadístico**

Para comprobar la influencia de cada una de las variables categóricas estudiadas (clon, densidad y tratamiento para Mozquita, y clon y tratamiento para Cantil I y II) sobre la variable altura y la producción de biomasa en verde por hectárea, se efectuó un análisis de la varianza (ANOVA) para comprobar la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la variable respuesta entre clones, niveles de tratamiento y niveles de densidad, así como entre todas las combinaciones

posibles de dichas variables. Por otra parte, en cada una de las plantaciones se determinó el clon más productivo de todos los empleados y se comprobó qué variables influían de manera más significativa sobre su producción de biomasa, volviéndose a ajustar un ANOVA igual al anterior, pero sin considerar el efecto del clon. Se consideró que las diferencias son significativas cuando el nivel de significación ha sido menor del 5% ( $p\text{-valor} < 0,05$ ). Tras comprobar si realmente existían diferencias estadísticamente significativas en relación a la variable respuesta, se llevó a cabo una comparación de medias con el fin de clasificar los tratamientos en grupos de igual productividad; para ello se empleó el test de Tukey's Honestly Significant Difference (HSD). Para resolver dichos análisis se empleó el programa estadístico SPSS 17.0. (ANALYTICAL SOFTWARE, 2008).

Tabla 1. Material vegetal empleado en los 3 ensayos.

Ensayo	Especie	Clon	Progenitor
Mozquita	Salix	Bjorn	<i>Salix schwerinii</i> x <i>Salix viminalis</i>
		Inger	<i>Salix trianta</i> x <i>Salix viminalis</i>
		Olof	<i>Salix viminalis</i> x ( <i>Salix schwerinii</i> x <i>Salix viminalis</i> )
Cantil I	Betula	<i>B. alba</i>	<i>Betula alba</i>
		AF2	<i>Populus</i> x <i>canadensis</i>
	Populus	Monviso	<i>Populus generosa</i> x <i>Populus nigra</i>
		Beaupré	<i>Populus deltoides</i> x <i>trichocarpa</i>
	Salix	<i>S. alba</i>	<i>Salix alba</i>
		Tora	<i>Salix schwerinii</i> x <i>Salix viminalis</i>
Cantil II	Populus	AF2	<i>Populus</i> x <i>canadensis</i>
		I-214	<i>Populus</i> x <i>euramericana</i>
		Raspalje	<i>Populus</i> x <i>interamericana</i>
	Salix	Olof	<i>Salix viminalis</i> x ( <i>Salix schwerinii</i> x <i>Salix viminalis</i> )
		Tordis	( <i>Salix viminalis</i> x <i>Salix schwerinii</i> ) x ( <i>Salix viminalis</i> )

Tabla 2. Niveles de fertilización y herbicida empleados para los 3 ensayos.

Nivel de tratamiento	Fertilización		Herbicida	
	Año 1	Años restantes	Año 1	Años restantes
FO (control)	No se aplica	No se aplica	No se aplica	No se aplica
F1	80 kg/ha de NH <sub>4</sub>	300 kg/ha de NPK 6:20:12	Aplicación de glifosato (4 l/ha)	Aplicación de glifosato (4 l/ha)
F2	160 kg/ha de NH <sub>4</sub> (20 - 25% de N)	600 kg/ha de NPK 6:20:12	Aplicación de glifosato (4 l/ha)	Aplicación de glifosato (4 l/ha)

#### 4. Resultados

Los resultados del ANOVA obtenidos en las tres plantaciones experimentales muestran diferencias estadísticamente significativas para las dos variables de estudio (altura y peso verde) respecto al factor clon. En el análisis correspondiente a la plantación de Mozquita, se observó que el factor densidad no tiene un efecto significativo sobre las variables analizadas, como ya se comentó previamente. Respecto al tratamiento (herbicida + fertilizante), la variable altura en el Cantil II fue la única que no mostró significación; el resto de los casos sí que presentaron diferencias estadísticamente significativas. La única interacción de primer orden que mostró significación fue clon\*tratamiento en el ensayo de Mozquita para la variable altura y para el peso en verde, el resto de posibles combinaciones en los distintos ensayos no reveló diferencias estadísticas (Tabla 3).

En la Tabla 4 se muestran los valores medios de la altura media de los brotes por cepa (m) y de producción de biomasa en verde (Mg ha<sup>-1</sup>), de todos los clones empleados en cada una de las

plantaciones estudiadas al final del turno. Los clones del género *Populus* han sido los que mejores resultados han mostrado, tanto en crecimiento en altura como en producción de biomasa.

Tabla 3. Resultados del ANOVA para cada una de las variables categóricas estudiadas, así como para las interacciones de primer y segundo orden entre ellas.

Factor	Ensayo	Altura (m)		Peso Verde (Mg ha <sup>-1</sup> )	
		F	p-valor	F	p-valor
Clon	Mozquita	47,969	<0,001	23,54	<0,001
	Cantil I	5,627	<0,001	3,638	0,013
	Cantil II	15,991	<0,001	9,455	<0,001
Densidad	Mozquita	0,279	0,600	3,865	0,057
	Cantil I	-	-	-	-
	Cantil II	-	-	-	-
Tratamiento	Mozquita	26,600	<0,001	11,915	<0,001
	Cantil I	15,596	<0,001	25,964	<0,001
	Cantil II	1,356	0,270	4,169	0,024
Bloque	Mozquita	1,393	0,258	0,521	0,597
	Cantil I	0,542	0,585	0,401	0,672
	Cantil II	0,042	0,959	1,199	0,310
Clon*Densidad	Mozquita	3,307	0,052	3,059	0,059
	Cantil I	-	-	-	-
	Cantil II	-	-	-	-
Clon*Tratamiento	Mozquita	3,369	0,019	3,510	0,016
	Cantil I	0,498	0,863	1,128	0,379
	Cantil II	0,243	0,989	1,070	0,412
Densidad *Tratamiento	Mozquita	0,908	0,412	0,551	0,581
	Cantil I	-	-	-	-
	Cantil II	-	-	-	-
Clon*Densidad*Tratamiento	Mozquita	1,699	0,172	1,229	0,315
	Cantil I	-	-	-	-
	Cantil II	-	-	-	-

Tabla 4. Valores medios del crecimiento en altura y de la producción de biomasa en biomasa verde (Mg ha<sup>-1</sup>) para todos los clones ensayados en los 3 cultivos. (Promedio ± desviación típica).

Ensayo	Género	Clon	Altura (m)	Peso Verde (Mg ha <sup>-1</sup> )
Mozquita	Salix	Bjor	2,47 ± 1,30	7,24 ± 5,74
		Inger	2,61 ± 1,22	12,42 ± 8,66
		Olof	4,80 ± 2,25	24,81 ± 16,20
Cantil I	Betula	Betula	1,30 ± 0,54	0,44 ± 0,84
		AF2	5,27 ± 1,19	67,85 ± 36,82
	Populus	Boupré	4,91 ± 1,35	61,00 ± 40,19
		Monviso	5,21 ± 1,98	56,56 ± 53,63
	Salix	S.alba	4,05 ± 1,06	42,06 ± 36,47
		S. viminalis	4,58 ± 1,40	33,09 ± 25,53
Cantil II	Populus	AF2	6,13 ± 1,11	99,74 ± 63,29
		I214	3,97 ± 1,09	21,80 ± 15,81
		Raspalje	6,39 ± 0,92	91,13 ± 65,42
	Salix	S.atrocinerea	2,13 ± 0,47	13,76 ± 7,36

	Olof	5,76 ± 1,71	29,95 ± 17,41
	Tordis	5,53 ± 1,10	28,02 ± 10,02

Tabla 5. Resultados del ANOVA para cada una de las variables categóricas estudiadas del clon que presentó una mayor producción de biomasa en cada ensayo, en función del factor tratamiento.

Factor	Ensayo / Clon	Altura (m)		Peso Verde (Mg ha <sup>-1</sup> )	
		F	p-valor	F	p-valor
Tratamiento	Mozquita - clon Olof	17,468	<0,001	6,503	0,009
	Cantil I - clon AF2	1,109	0,389	5,752	0,040
	Cantil II - clon AF2	0,728	0,521	0,922	0,448

Una vez realizado el análisis de varianza con los clones que mostraron un mayor rendimiento en producción de biomasa para cada ensayo (Tabla 5), con los resultados que mostraron diferencias estadísticamente significativas se efectuó una comparación de medias mediante el test de Tukey's cuya finalidad fue la de clasificar los tratamientos en grupos de igual productividad en relación a los tratamientos empleados. En vista de los resultados que muestra la Tabla 6, se observa que en los ensayos de Mozquita y Cantil I, las parcelas testigo (F0) formaron un grupo donde la cantidad de biomasa que se genera es menor que en las parcelas que se le aplica algún tratamiento, siendo el tratamiento F2 el que forma un grupo independiente; mientras que el tratamiento F1 presenta valores intermedios entre ambos grupos. En cuando al crecimiento en altura, solamente existen diferencias estadísticamente significativas para el clon Olof en Mozquita, formándose dos grupos, uno de ellos de menor desarrollo (parcelas F0) y el otro formado por las parcelas donde se le aplicó alguno de los tratamientos ensayados (F1 y F2). Para el resto de los casos, el análisis de varianza no reveló grupos estadísticamente diferentes.

Tabla 6. Valores medios de las dos variables de estudio del clon que presentó una mayor producción de biomasa en cada ensayo, en relación con el factor tratamiento y la agrupación según los resultados de la prueba de comparación múltiple del test de Tukey's.

Ensayo / Clon	Tratamiento	Altura (m)	Peso Verde (Mg ha <sup>-1</sup> )	Peso Verde (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Mozquita Clon Olof	F0	2,746 <sup>b</sup>	6,345 <sup>b</sup>	1,269
	F1	5,594 <sup>a</sup>	29,964 <sup>a</sup>	5,993
	F2	5,712 <sup>a</sup>	21,902 <sup>ab</sup>	4,380
Cantil I Clon AF2	F0	4,716 <sup>a</sup>	27,636 <sup>b</sup>	5,527
	F1	5,082 <sup>a</sup>	76,847 <sup>ab</sup>	15,369
	F2	6,173 <sup>a</sup>	99,074 <sup>a</sup>	19,815
Cantil II Clon AF2	F0	5,546 <sup>a</sup>	59,047 <sup>a</sup>	11,809
	F1	6,169 <sup>a</sup>	116,481 <sup>a</sup>	23,296
	F2	6,675 <sup>a</sup>	123,705 <sup>a</sup>	24,741

\*Los valores medios en las columnas señaladas con la misma letra reflejan que no presentan diferencias estadísticamente significativas. Diferentes letras indican una diferencia significativa (a>b) en función del factor tratamiento (p-valor<0,05).

## 5. Discusión

La producción de biomasa en plantaciones de cultivos energéticos forestales (SRC) se ve influenciada por los distintos tipos de material vegetal que se pueden emplear, las condiciones del sitio y las diferentes prácticas de manejo que se pueden llevar a cabo (BAUM et al., 2002). En el presente estudio, los resultados obtenidos en los ensayos instalados en los terrenos de antiguas

escombreras de mina (Mozquita, Cantil I y Cantil II), corroboran dicha afirmación, ya que en estos casos la producción de biomasa y el desarrollo del cultivo depende del clon seleccionado, del tratamiento aplicado (fertilización y herbicida) y del emplazamiento del ensayo, ya que a pesar de utilizar clones iguales los resultados para cada prueba resultaron ser diferentes.

Varios estudios realizados en Europa donde se utilizaron en las mismas condiciones estacionales diferentes clones de sauce y chopo, indican que por lo general las especies del género *Populus* tienen una mayor productividad y sus rendimientos son mayores que los clones del género *Salix* (CHRISTERSSON, 1987; JUG, 1997); una de las razones de este suceso es que los clones del género *Populus* son más adecuados para los objetivos de producción de biomasa con fines energéticos debido a las características ecológicas de la Península Ibérica (SAN MIGUEL y MONTOYA, 1984; CIRIA et al., 1996). Esto fue lo que sucedió en los ensayos planteados; en el ensayo de Mozquita donde solamente se utilizaron clones de sauce, si se compara su crecimiento en altura y la producción de biomasa en verde, se observa que a pesar de haber obtenido unos rendimientos bastante superiores a los otros dos clones ensayados, el desarrollo del Olof es aproximadamente un 9 % y un 20% menor que la altura media del clon AF2 (chopo), en Cantil I y Cantil II, respectivamente. La diferencia en producción de biomasa es mucho mayor entre ambas especies, ya que el rendimiento en las parcelas de chopo es un 65% mayor en Cantil I y un 75% superior en Cantil II, que en con el clon Olof. Dentro del género *Salix*, son varios los estudios que afirman que clones que proceden de *Salix viminalis* (como lo es el clon Olof), son los que presentan un rendimiento superior en cuanto a producción de biomasa en sistemas de rotación corta (WEIH & NORDH, 2002), además de indicar que la producción viene determinada por la adecuación de la planta a las condiciones del sitio.

En cuanto al tratamiento aplicado, la combinación de fertilizante y herbicida en distinta proporción, constituyó una variable muy influyente en el crecimiento en altura y la producción de biomasa, de los clones Olof y AF2, tanto en Mozquita como en Cantil I, respectivamente. En este caso se ha observado que, si bien la diferencia en cuanto a producción de biomasa es muy notable entre las parcelas en las que se aplicó fertilizante y herbicida (F1 y F2) y las de control (F0), esta se reduce cuando se comparan los resultados obtenidos en las parcelas con distintos niveles de tratamiento; de hecho, las proporciones aplicadas han dado lugar a diferencias destacables en la producción, aunque ésta no sea proporcional a dichas dosis. Una relación directa entre la fertilización y la producción de biomasa fue encontrada también por otros autores como ADEGBIDI et al., (2001) y LABRECQUE & TEODOREUS (2003).

En cuanto a las interacciones entre factores, se observó que el tratamiento tiene solamente efecto sobre el crecimiento del clon Olof en Mozquita. No ocurre lo mismo en los otros dos ensayos (Cantil I y Cantil II), donde el clon AF2 del género *Populus* no presenta diferencias estadísticamente significativas respecto al tratamiento aplicado, como ocurría en el estudio de SIXTO et al. (2007).

Por otra lado, en el análisis correspondiente a la plantación de Mozquita, se observó que la densidad no tenía un efecto significativo sobre las variables de estudio. El hecho de ensayar con dos densidades de plantación consideradas óptimas en SRC hizo ver si realmente ese aumento de número de pies/ha llevaba a conseguir un incremento notable del rendimiento. Se pudo comprobar que esto no sucedía. WILKINSON et al., (2007) indica que si solamente se produce un pequeño incremento en la producción de biomasa empleando una mayor densidad de plantas, la recuperación económica de dicho aumento no compensa el gasto que supone el coste de la planta y la instalación el cultivo. Según la FORESTRY COMMISSION (2002), los clones de *Salix viminalis* incrementan su producción en biomasa a medida que aumenta la densidad de plantación. Sin embargo, no todos los autores coinciden en el efecto positivo que supone el incremento de la densidad sobre la producción de biomasa. Por ejemplo, VERWIJST & TELENIUS (1999) afirma que la producción total permanece independiente de la densidad, e incluso que puede reducirse como consecuencia del aumento de la mortalidad natural derivada de la propia densidad excesiva.

Por último, haciendo una valoración en términos generales del crecimiento en altura y de la producción de biomasa al finalizar los 5 años de la primera rotación, observamos que a pesar de que los ensayos se encuentran ubicados en un terreno en el que las condiciones edáficas de partida no parecen ser las más adecuadas, si se compara con otros estudios a nivel mundial se puede concluir que los resultados son esperanzadores. En esta ocasión, el clon Olof en Mozquita resultó ser el que

mejores resultados presentó, en torno a 5 m de altura y una producción de biomasa anual de 5 Mg ha<sup>-1</sup>; el clon AF2 que resultó ser el más productivo en los otros dos ensayos presentando una altura media de más de 5,2 m, llegando a superar los 6 m en Cantil II; y una producción en peso verde anual de más de 13 Mg ha<sup>-1</sup> en Cantil I y aproximadamente 25 Mg ha<sup>-1</sup> en Cantil II.

Un estudio llevado a cabo en terrenos agrícolas en Canadá por LABRECQUE & TEODORESCU (2005) en el cual se comparan el rendimiento en campo y la producción de biomasa de diferentes clones de sauce y chopo como se hizo en este ensayo, presentó valores similares a los reportados en esta investigación, con crecimientos del género *Populus* ( $\approx 7$  m) superiores al género *Salix* ( $\approx 4,5$  m); en cuanto a los rendimientos de producción para el chopo, estos fueron semejantes a los recogidos en este estudio, sin embargo para el sauce sus resultados fueron superiores a los mostrados en este caso. Según otra investigación realizada por WALLE et al., (2007) en terrenos agrícolas donde no se aplicó ni fertilizante ni herbicida, se consiguieron rendimientos para el sauce de 3,4 Mg ha<sup>-1</sup> y de 3,5 Mg ha<sup>-1</sup> para el chopo; los resultados obtenidos en este estudio son similares a investigaciones donde se analiza el efecto de la densidad y de distintas dosis de fertilización y herbicida (BULLARD et al., 2002; BUNGART & HÜTTL, 2004; WILKINSON et al., 2007; PARIS et al., 2011). Cuando las condiciones estacionales y climatológicas son favorables, hace que los rendimientos alcanzados al final del turno sean los óptimos indistintamente del género con el que se esté trabajando, logrando excelentes resultados (CEULEMANS et al., 1996; LABRECQUE & TEODORESCU, 2005; PEARSON et al., 2010).

## 6. Conclusiones

El factor clon es el que más ha condicionado el resultado de las variables de estudio en los ensayos llevados a cabo. El rendimiento y la producción de biomasa ha resultado ser claramente superior para el clon AF2 (género *Populus*) respecto a los clones de sauce ensayados; a pesar de ello, los resultados obtenidos para el clon Olof (género *Salix*) han sido aceptables si se tiene en cuenta el terreno empobrecido procedente de actividades mineras donde se instalaron los cultivos. También el tratamiento aplicado en cada parcela (aplicación de fertilizante y herbicida) tuvieron un efecto significativo tanto en el crecimiento en altura, como en la producción de biomasa aérea en las plantaciones energéticas estudiadas, se entiende que la acción combinada del control de la competencia de la vegetación competidora y aplicación de nutrientes es lo que genera una mayor producción. En ningún caso la densidad de plantación tuvo efecto alguno sobre la producción.

Sería de interés hacer una valoración de los costes de los distintos tipos de fertilización y los posibles ingresos por la venta de la madera; sin embargo al tratarse de unos ensayos de pequeñas dimensiones, donde los trabajos de mantenimiento y la corta final se hicieron manualmente, intentar realizar una evaluación desde el punto de vista económico no sería la adecuada, ya que sin lugar a duda, los trabajos manuales son mucho costosos que si son mecanizados. En todo caso, en vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que la aplicación de la dosis de tratamiento de fertilización F2 (doble F1), al no suponer una notable diferencia de producción de biomasa, se entiende que no sería la cantidad óptima de fertilización, y por tanto no compensaría el coste que ello supone.

## 7. Agradecimientos

Los terrenos en los que se han instalado los cultivos han sido cedidos por el Grupo Hunosa, que además ha financiado la investigación "Ensayo de cultivos energéticos en antiguos terrenos de cielo abierto de HUNOSA" en el cual se engloba este estudio, desde el año 2008 hasta la actualidad; la investigación también fue apoyada por la Cátedra Hunosa de la Universidad de Oviedo.

## 8. Bibliografía

ADEGBIDI, H.G.; VOLK, T.A.; WHITE, E.H.; ABRAHAMSON, L.P.; 2001. Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bionergy plantations in New York State. *Biomass Bioenerg.* 20: 399 – 411.

ANTUÑA, F. S.; 2005. La organización de los espacios mineros de la hulla en Asturias. *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales.* 9: 2.

BAUM, C.; LEINWEBER, P.; WEIH, M.; LAMERSDORF, N.; DIMITRIOU, I.; 2009. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Agriculture and Forestry Research.* 3 (59): 183 – 196.

BLENNOW, K.; PERSSON, E.; LINDNER, M.; PACHECO FAIAS S.; HANEWINKEL, M.; 2014. Forest owner motivations and attitudes towards supplying biomass for energy in Europe. *Biomass Bioenerg.* 67: 223 – 230.

BOYLE G.; 2004. Renewable energy power for a sustainable future. UK: Oxford. University Press.

BROECKX, L.S.; VERLINDEN, M.S.; CEULEMANS, R.; 2012. Establishment and two-year growth of a bio-energy plantation with fast-growing *Populus* trees in Flanders (Belgium): Effects of genotype and former land use. *Biomass Bioenerg.* 42: 151 – 163.

BULLARD, M.J.; MUSTILL, S.J.; MCMILLAN, S.D.; NIXON, P.M.I.; CARVER, P.; BRITT, C.P.; 2002. Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.- 1 . Yield response in two morphologically diverse varieties. 22: 5 – 25.

BUNGART, R.; HÜTTL, R.; 2004. Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in a short rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. *Eur. J. For. Res.* 123: 105 – 115.

CEULEMANS, R.; MCDONALD, A.J.S.; PEREIRA, J.S.; 1996. A comparison among eucalypt, poplar and willow characteristics with particular reference to a coppice, growth-modelling approach, *Biomass Bioenerg.* 11: 215 – 231.

CHRISTERSSON, L.; 1987. Biomass production by irrigated and fertilized *Salix* clones. *Biomass*, 12(2): 83 – 95.

CIRIA, M.P.; GONZÁLEZ, E.; MAZÓN, P.; CARRASCO, J.E.; 1996. Influence of the rotation age and plant density on the composition and quality of poplar biomass. *Biomass for Energy and Environment.* 2: 968 – 973.

CONSEJO DE EUROPA; 2007. Plan de acción del Consejo Europeo (2007-2009). Política Energética para Europa. 7224/1/07 REV1, Bruselas.

EEA; 2011. Biogeographical regions. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. [online] URL: <http://www.eea.europa.eu/dataand-maps/data/biogeographical-regions-europe-1>.

EUROPEAN COMMISSION; 2008. 20 20 by 2020, Europe's climate change opportunity. COM 30.

FORESTRY COMMISSION; 2003. Mensurational variables protocol. In: Yield Models for Energy Coppice of Poplar and Willow. Forestry Commission, Ae. 14.

GONZÁLEZ-FERREIRO, E.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARREIRO-FERNÁNDEZ, L.; BUJAN, S.; BARBOSA, M.; SUAREZ, J.; BYE, I.; MIRANDA, D.; 2013. A mixed pixel and region-based approach for using airborne laser scanning data for individual tree crown delineation in *Pinus radiata* D. Don plantations. *International Journal of Remote Sensing*. 34: 7671 – 769

IDAE; 2007. Energía de la Biomasa. Ed. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 134 p. Madrid.

JAMA, A.; NOWAK, W.; 2012. Willow (*Salix viminalis* L.) in purifying sewage sludge treated soils. *Polish J. Agron*. 9: 3 – 6.

JUG, A.; MAKESCHIN, F.; REHFUESS, K. E.; HOFMANN-SCHIELLE, C.; 1999. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects. *Forest ecology and management*. 121(1): 85 – 99.

KEOLEIAN, G. A.; VOLK, T. A.; 2005. Renewable Energy from Willow Biomass Crops: Life Cycle Energy, Environmental and Economic Performance, *CRC. Crit. Rev. Plant Sci*. 24: 385 – 406.

KUZOVKINA, Y. A.; QUIGLEY, M. F.; 2005. Willows beyond wetlands: uses of *Salix* L. species for environmental projects. *Water, Air, and Soil Pollution*. 162 (1-4): 183 – 204.

LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T. I.; 2003. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada, *Biomass Bioenerg*. 25: 135 – 146.

LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T. I.; 2005. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass Bioenerg*. 29(1): 1 – 9.

MONTERO, G.; SERRADA, R.; 2013. La situación de los bosques y el sector forestal en España-ISFE. Pontevedra.

NACIONES UNIDAS; 2015. Aprobación del Acuerdo de París (FCCC/CP/2015/L.9). Conferencia de las Partes de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, 21er período de sesiones. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>.

PAREDES-SÁNCHEZ, J. P.; GARCÍA-ELCORO, V. E.; ROSILLO-CALLE, F.; XIBERTA-BERNAT, J.; 2016. Assessment of forest bioenergy potential in a coal-producing area in Asturias (Spain) and recommendations for setting up a Biomass Logistic Centre (BLC). *Applied Energy*. 171: 133 – 141.

PARIS, P.; MARESCHI, L.; SABATTI, M.; PISANELLI, A.; ECOSSE, A.; NARDIN, F.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G.; 2011. Comparing hybrid *Populus* clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: Survival, growth and yield. *Biomass Bioenerg.* 35(4): 1524 – 1532.

PEARSON, L. E.; 2010. U.S. Patent No. 7,658,776. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

SAN MIGUEL, A.; MONTOYA, J. M.; 1984. Resultados de los primeros 5 años de producción de talleres de chopo en rotación corta (2-5 años). In *Anales INIA, Serie Forestal*. 8: 73 – 91.

SIXTO, H.; HERNANDEZ, M. J.; BARRIO, M.; CARRASCO, J.; CAÑELLAS, I.; 2007. *Populus* genus for the biomass production for energy use: a review. *Forest Systems*. 16(3): 277 – 294.

SPSS, S.; 2008. 16.0 for Windows. Chicago: SPSS Inc.

TAHVANAINEN, L.; RYTKO, V.; 1999. Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass Bioenerg.* 16: 103 – 117.

Unión Europea; 2009. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*. 5; 06 – 09.

VANDE WALLE, I.; VAN CAMP, N.; VAN DE CASTEELE, L.; VERHEYEN, K.; LEMEUR, R.; 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I—Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass Bioenerg.* 31: 267 – 275.

VENTURI, P.; GIGLER, J.K.; HUISMAN, W.; 1999. Economical and technical comparison between herbaceous (*Miscanthus x giganteus*) and woody energy crops (*Salix viminalis*). *Renewable Energy*. 16(1-4): 1023-1026.

VERWIJST, T.; TELENUS, B.; 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *For. Ecol. Manage.* 121: 137-146.

WEIH, M.; NORDH, N.E.; 2002. Characterising willows for biomass and phytoremediation: growth, nitrogen and water use of 14 willow clones under different irrigation and fertilization regimes. *Biomass Bioenerg.* 23: 397 – 413.

WILKINSON, J.; EVANS, E.; BILSBORROW, P.; WRIGHT, C.; HEWISON, W.; PILBEAM, D.; 2007. Yield of willow cultivars at different planting densities in a commercial short rotation coppice in the north of England. *Biomass Bioenerg.* 31: 469 – 474.

ZURBA, K.; OERTEL, C.; MATSCHULLAT, J.; 2013. CO<sub>2</sub> emissions from willow and poplar short rotation forestry (SRF) on a derelict mining soil, Conference: International Scientific Conference - Environmental changes and Adaptation Strategies, At Skalica, Slovakia.